

DOI:10.11937/bfyy.201708014

# 土壤新风系统在日光温室中应用的可行性

张纪涛<sup>1</sup>, 李 翠<sup>2</sup>, 马大炜<sup>1</sup>, 林 琬<sup>1</sup>, 籍增顺<sup>1</sup>

(1. 山西省农业科学院 现代农业研究中心, 山西 太原 030031; 2. 太原理工大学 物理与光电工程学院, 山西 晋中 030600)

**摘 要:**为了明确土壤新风系统在日光温室中应用的可行性, 设置了不同风速(5.8、4.6、3.1 m·s<sup>-1</sup>)条件, 以监测土壤新风系统进出口空气温湿度及不同管道长度的气流温度, 并计算了系统的热特性。结果表明: 日光温室内部≥50 cm 深土壤的温度比较恒定, 日变化幅度≤0.3℃。在5.8、4.6、3.1 m·s<sup>-1</sup>的流速下, 新风经过系统温度分别提高了7.8~8.9、9.8~11.9、6.3~7.8℃; 出口空气湿度分别为42.3%~52.0%、35.4%~40.3%、61.6%~83.6%; 进出口焓差分别为7.7~9.4、9.9~12.1、9.3~12.5 kJ·kg<sup>-1</sup>; 运行时段内吸收土壤的热量分别为23 160、23 492、14 884 kJ。土壤新风系统可以显著提升新风温度, 出口处新风湿度低于室内空气湿度, 具有良好的吸热能力, 说明土壤新风系统可以用于冬季日光温室空气环境的调控。

**关键词:**日光温室; 土壤新风系统; 通风

**中图分类号:**S 626.506<sup>+</sup>.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2017)08-0060-05

日光温室是我国独创的温室类型, 具有缓解冬季蔬菜供需矛盾的作用<sup>[1-3]</sup>, 目前, 日光温室通风结构主要是屋面底部和顶部通风, 在低温时期一般只开顶部通风, 通风时间≤4 h, 通风不足、空气湿度大、

病害发生严重等问题严重影响着日光温室生产, 而加温通风能耗成本高, 难以在实际生产中普遍使用<sup>[4-5]</sup>。土壤新风系统是充分利用土壤能来预冷或预热新风, 以达到降低新风负荷、节约能源的目的, 已被系统研究并广泛应用于建筑结构中<sup>[6-11]</sup>。土壤新风系统主要是将通风管道埋置于地下, 通过与土壤的热交换来提高或降低室外空气温度, 保证进入室内的空气温度较适宜<sup>[12]</sup>。PFAFFEROTT<sup>[13]</sup>的试验结果表明, 系统出口温度可以维持20.4℃;

**第一作者简介:**张纪涛(1986-), 男, 硕士, 助理研究员, 现主要从事设施园艺工程等研究工作。E-mail: zhangjitaotao\_xn@126.com.  
**基金项目:**山西省科技攻关资助项目(20130311010-2); 山西省重点研发计划一般资助项目(201603D221036-2)。  
**收稿日期:**2016-12-13

**Abstract:** Optimizing the wall structure and exerting its performance of heat preservation to greatest extent, is significant to improve the technologies in solar greenhouse crop production. Three solar greenhouses with different north wall structures, including brick-loess wall (a layer of 50 cm loesses between two 24 cm bricks), brick-cinder wall (a layer of 50 cm cinders between two 24 cm bricks) and brick-polystyrene wall (the inner 37 cm bricks and the outer 10 cm polystyrene boards), were used as research subjects in this study. The change rules of the indoor air temperature, the heat transfer capacity and the inner surface temperature of north-wall were analyzed under typical weather days. And the spatial and temporal distribution features of temperatures in different north walls were also investigated. Differences of thermal insulating properties of the three solar greenhouses were preliminary evaluated. The results showed that the brick-polystyrene north-wall had the better instantaneous heat absorption and dissipation capacities, while its heat-storage and discharge persistence was poor. Moreover, the brick-loess north wall had the better instantaneous heat absorption and continuous thermal insulating integrated properties. Overall, the solar greenhouse with brick-loess north wall had more extensive spreading values in Jinzhong area.  
**Keywords:** north-wall; solar greenhouse; compound structure; thermal insulation properties

杨艳芳等<sup>[14]</sup>研究表明,土壤新风系统夏季降温幅度为 13℃,冬季系统增温幅度为 16℃。土壤新风系统具有良好的节能特性,可以解决日光温室通风不足的问题。该研究通过监测日光温室土壤新风系统的基本参数,分析其在日光温室上的可应用性,以期为土壤新风系统在日光温室应用推广提供一定的参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

由图 1 可知,日光温室土壤新风系统主要由风机、管道、进风口、出风口等组成。试验日光温室为钢结构日光温室,跨度 9 m,长度 24 m,脊高 4.5 m。将管道(PVC-U,  $\Phi$  110 mm)布置于地下 50 cm 的土壤中,管道地下水平长度 14 m。风机为 SPB100 型管道风机,送风量  $350 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,功率 65 W。

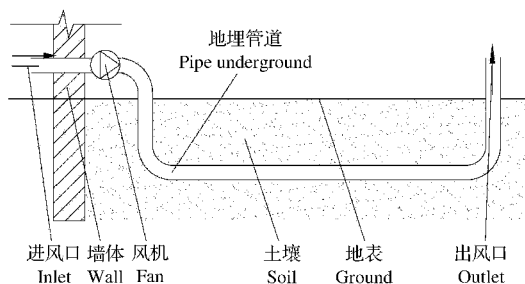


图 1 日光温室土壤新风系统结构

Fig. 1 Structure of buried pipe fresh air system in solar greenhouse

## 1.2 试验方法

试验于2015年1月在山西省农业科学院东阳试验示范基地(北纬37.55°,东经112.68°)进行。

1.2.1 前期土壤温度监测 在日光温室中间无遮挡处,设置地下 0(地表)、10、20、30、50、70 cm 等 6 个

测点,使用 T 型热电偶配合 JTDL-80 多通道温度热流测试仪每 15 min 采集 1 次测点温度。

1.2.2 管道通风系统温度检测 将电容调速开关接入风机调控管道风速,设置3档风速:A  $5.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , B  $4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , C  $3.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,每个风速工况下进行2 d的测试,风机运行时间设置为19:00至次日07:00。在系统进出口放置一个RC-4H温湿度自动记录仪,记录进出口温湿度;进出口风速采用德图Testo405型热敏风速仪测定。于管道地下水平位置设置0.2、4、6、10、14 m等6个温度测点,采用T型热电偶配合JTDL-80多通道温度热流测试仪每15 min采集1次测点温度。

1.2.3 传热特性的计算<sup>[15-16]</sup> 1) 湿空气焓  $h = 1.01t + d(2500 + 1.84t)$ , 其中  $h$  为湿空气焓,  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $t$  为温度;  $d$  为湿空气含湿量;  $d = \Psi d_0$ , 式中,  $\Psi$  为相对湿度;  $d_0$  为饱和含湿量。湿空气热交换量与焓差表示,  $\Delta h = h_1 - h_2$ , 式中,  $h_1$  为出风口空气焓值;  $h_2$  为进风口空气焓值。2) 空气经过管道吸收的热量  $Q = \Sigma |\Delta h_i| q_i \Delta \tau_i / v_i$ , 式中,  $q_i$  为管道空气的体积流量;  $v_i$  为干空气的比体积。

### 1.3 数据分析

采用 Excel 2003 软件对试验数据进行处理;利用 Origin 8.5 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 日光溫室內土壤溫度變化

由图 2 可知,在监测期间,0、10、20、30、50、70 cm 深度的土壤温度的变化范围分别为 12.1~22.1、13.9~18.8、15.0~18.3、15.3~17.9、16.3~18.9、17.1~19.6 °C。50、70 cm 深的土壤温度日变化幅

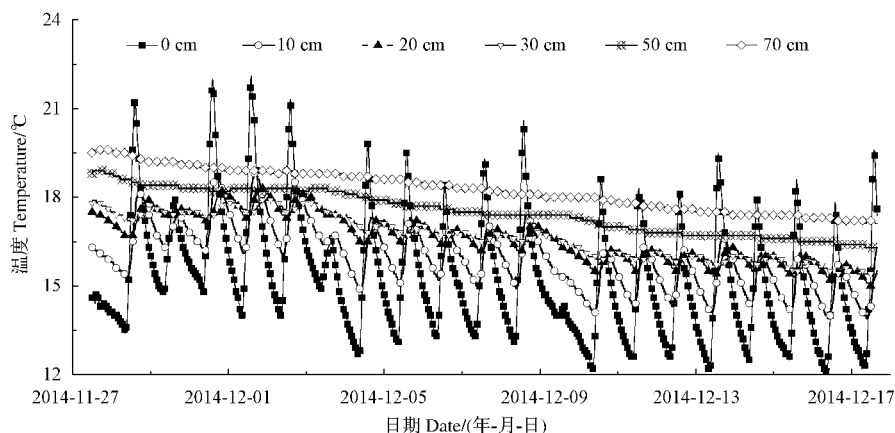


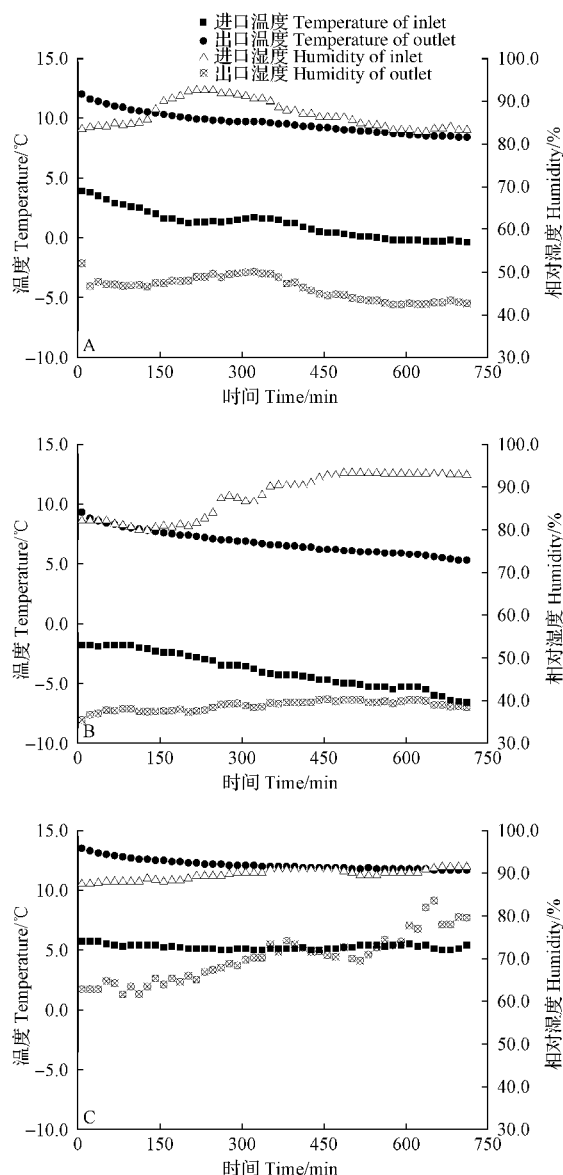
图 2 日光温室内不同深度的土壤温度

Fig. 2 Soil temperature of different depth in solar greenhouse

度 $\leq 0.3^{\circ}\text{C}$ 。可见,日光温室 $\geq 50\text{ cm}$ 深的土壤温度比较恒定,尤其是在夜间土壤温度显著高于空气温度。

## 2.2 土壤新风系统进出口温度的变化

由图3可知,以 $5.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 进行测试期间,进口空气的温度为 $-0.4\sim 3.9^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 $82.8\%\sim 92.5\%$ ;出口空气温度为 $8.4\sim 12.0^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为



注:A、B、C分别指风速 $5.8, 4.6, 3.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。下同。

Note: A, B, C in figure means that air speed of pipe at conditions of  $5.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}, 4.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}, 3.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectively. The same as below.

图3 土壤新风系统进风口温湿度

Fig. 3 Air temperature and humidity of inlet and outlet of buried pipe fresh air system

$42.3\%\sim 52.0\%$ ;出口温度提升了 $7.8\sim 8.9^{\circ}\text{C}$ 。以 $4.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 进行测试期间,进口空气的温度为 $-6.6\sim -1.8^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 $79.8\%\sim 93.3\%$ ;出口空气温度为 $5.3\sim 9.3^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 $35.4\%\sim 40.3\%$ ;出口温度提升了 $9.8\sim 11.9^{\circ}\text{C}$ 。以 $3.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 进行测试期间,进口空气的温度为 $5.0\sim 5.7^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 $87.5\%\sim 91.5\%$ ;出口空气温度为 $11.7\sim 13.5^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 $61.6\%\sim 83.6\%$ ,出口温度提升了 $6.3\sim 7.8^{\circ}\text{C}$ 。

## 2.3 管道长度对新空气增温的影响

由图4可知,系统在 $5.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速条件下,在

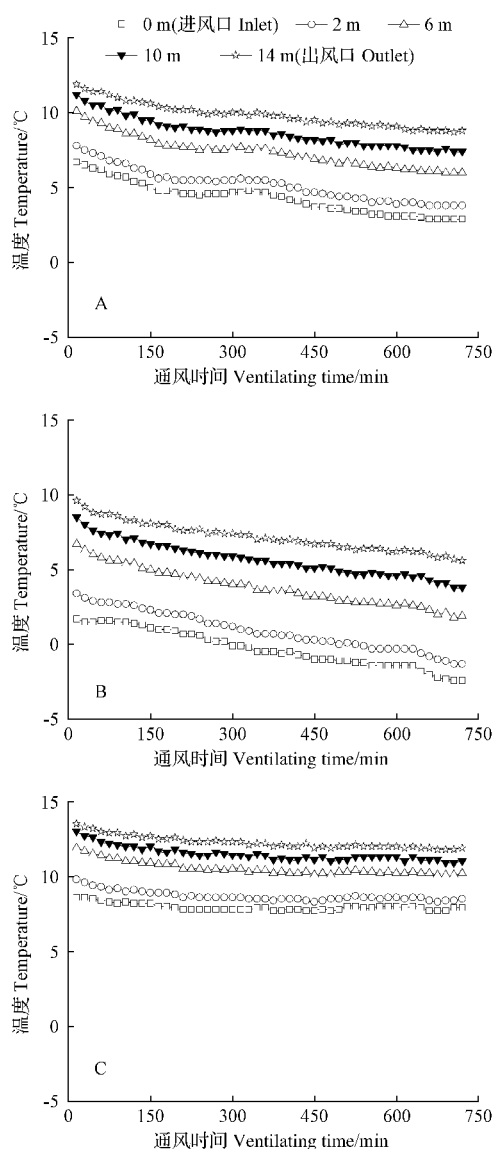


图4 土壤新风系统管道内不同位点的空气温度

Fig. 4 Air temperature of different points from inside pipe of buried pipe fresh air system

2、6、10、14 m 管径处出口空气温度分别提高了 0.89、3.07、4.36、5.54 °C；在  $4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速下，4 个测点空气温度分别提高了 1.18、4.09、5.95、7.46 °C；在  $3.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速下，4 个测点空气温度分别提高了 0.74、2.58、3.54、4.33 °C。3 种风速下，随管径长度的增加出口空气温度逐渐增加；但因入口空气湿度的影响，单位管长提升的温度值的风速大小顺序为  $4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} > 5.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} > 3.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

#### 2.4 土壤新风系统的热特性

室外空气温度经过系统焓值增加，进出口湿空气焓差相应变化。由图 5 可知，在 5.8、4.6、

$3.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速下，进出口焓差分别为 7.7~9.4、9.9~12.1、9.3~12.5  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。系统运行过程中不断从土壤中吸收储存的热量，在 5.8、4.6、 $3.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风速下，系统运行时段内吸收土壤的热量分别为 23 160、23 492、14 884 kJ。

### 3 讨论与结论

该试验重点从日光温室土壤温度变化、系统进出口温湿度情况及吸热性能等方面进行了分析，为土壤新风系统在冬季日光温室中的应用提供了实证。土壤新风系统出口温度高于室内空气温度、湿度低于空气湿度，因而可以用于降低日光温室室内湿度，而不影响室内温度。在经济成本方面，该试验构筑的日光温室土壤新风系统费用构成为风机 370 元、PVC 管道 240 元、人工费 100 元，总成本为 710 元，使用年限以 15 年计，年均成本约为 47 元，而运行成本约为 0.5 元（运行时长为 12 h，电费为  $0.7 \text{ 元} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ），系统投入成本和运行成本均很低，适合目前生产现状的需求。

该研究虽明确了土壤新风系统在日光温室中应用的可行性，但还存在一些亟需明确的问题：一是系统运行吸热与土壤供热平衡的问题，还需要进行深入的研究分析，在保证系统运行效果和不影响栽培土壤温度的条件下，完善系统设计。二是在空气湿度调控对蔬菜增产、品质改善、资源利用率的影响方面进行深入研究，为精准控制空气湿度提供依据，以保证合理生态经济效益。

日光温室内部  $\geq 50 \text{ cm}$  深土壤的温度比较恒定，日变化幅度  $\leq 0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，夜间土壤温度显著高于空气温度，可以为土壤新风系统地埋管进行增温。土壤新风系统可以显著提高新风温度，在 5.8、4.6、 $3.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的流速下，温室温度分别被提高了 7.8~8.9、9.8~11.9、6.3~7.8 °C；同时出口空气湿度分别为 42.3%~52.0%、35.4%~40.3%、61.6%~83.6%，均显著低于日光温室内部空气相对湿度。随管径长度的增加，出口空气温度逐渐增加，直至接近管壁温度。试验结果显示，单位管长提升的温度值  $4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} > 5.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} > 3.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在 5.8、4.6、 $3.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速下，系统运行时段内吸收土壤的热量分别为 23 160、23 492、14 884 kJ。说明土壤新风系统具有良好的吸热能力，可以用于日光温室空气湿度环境的调控。

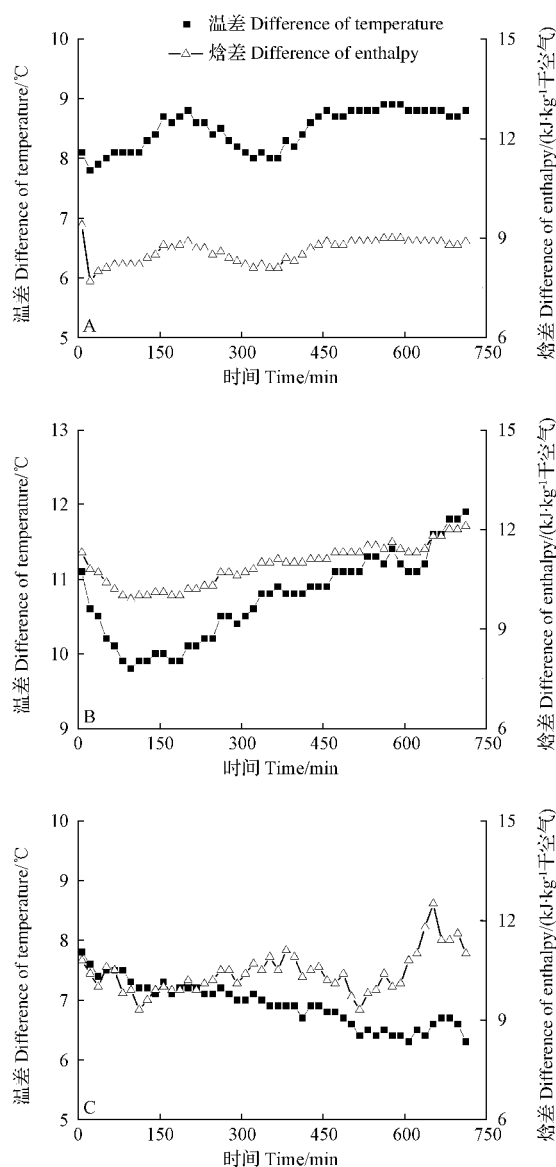


图 5 土壤新风系统进出风口温差与焓差

Fig.5 Difference of air temperature and enthalpy of inlet and outlet of buried pipe fresh air system

## 参考文献

- [1] 李天来. 我国日光温室产业发展现状与前景[J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(2): 131-138.
- [2] 李虎岗, 王双喜. 节能日光温室研究现状与发展方向[J]. 现代农业科技, 2015(13): 241-243.
- [3] 王伟, 张京社, 王引斌. 我国日光温室墙体结构及性能研究进展[J]. 山西农业科学, 2015, 43(4): 496-498.
- [4] 王克安, 李絮花, 吕晓惠, 等. 不同结构日光温室温湿度变化规律及其对番茄产量和病害的影响[J]. 山东农业科学, 2011(3): 33-36.
- [5] 袁月明, 王春野, 刘海枝, 等. 北方日光温室的冬季除湿技术[J]. 吉林农业大学学报, 2016, 38(1): 122-126.
- [6] TROMBE A, SERRRES L. Air-earth exchanger study in real site experimentation and simulation[J]. Energy and Buildings, 1994, 21(2): 155-162.
- [7] BOJIC M, TRIFUNOVIC N, PAPADAKIS G. Numerical simulation, technical and economic evaluation of air-to-earth heat exchanger coupled to a building[J]. Energy, 1997, 22(12): 1151-1158.
- [8] WONTUG S, HIDEKI T. Study on fresh air load reduction system by air-to-earth heat exchanger using underground double floor space[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2001, 2(1): 41-48.
- [9] 桂玲玲, 张少凡. 地道风在建筑通风空调中的利用研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2010(5): 67-72.
- [10] 吴俊涛, 赵冰, 湛文贤, 等. 土壤空气换热建筑新风系统运行性能测试研究[J]. 河北工业大学学报, 2014, 43(1): 81-87.
- [11] 刘宏, 杜震宇, 程远达. 日光温室湿热环境作用下土壤-空气换热器动态换热特性的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(18): 97-103.
- [12] 石发恩, 高松涛, 朱萌萌, 等. 基于土壤能的地下埋管新风系统冷却能力研究[J]. 江西理工大学学报, 2015, 36(1): 57-63.
- [13] PFAFFEROTT J. Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency[J]. Energy & Buildings, 2003, 35(10): 971-983.
- [14] 杨艳芳, 刘雄, 周敏. 土壤空气换热系统在博物馆建筑中的应用研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(9): 1352-1358.
- [15] 王永维, 苗香雯, 崔绍荣, 等. 温室地下蓄热系统换热特性研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 248-251.
- [16] 王永维, 苗香雯, 崔绍荣, 等. 温室地下蓄热系统蓄热和加温性能[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 75-78.

## Feasibility of Application of Buried Pipe Fresh Air System in Solar Greenhouse

ZHANG Jitao<sup>1</sup>, LI Cui<sup>2</sup>, MA Dawei<sup>1</sup>, LIN Lu<sup>1</sup>, JI Zengshun<sup>1</sup>

(1. Research Center of Modern Agriculture, Shanxi Academy of Agricultural Science, Taiyuan, Shanxi 030031; 2. College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Jinzhong, Shanxi 030600)

**Abstract:** To explore the feasibility of application of buried pipe fresh air system in solar greenhouse, three kinds of different air velocities ( $5.8, 4.6, 3.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) were set up and monitored the air temperature and humidity of inlet and outlet of system, and recorded the temperature in the five points in pipe, and then thermal characteristics of the system were calculated. The results showed that the daily temperature difference was  $\leq 0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Under conditions of  $5.8, 4.6, 3.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the new air temperature increased  $7.8-8.9, 9.8-11.9, 6.3-7.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , and air humidity of outlet were  $42.3\%-52.0\%, 35.4\%-40.3\%, 61.6\%-83.6\%$ , and enthalpy difference of outlet and inlet were  $7.7-9.4, 9.9-12.1, 9.3-12.5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , and the absorbed heat by the soil were  $23\ 160, 23\ 492, 14\ 884 \text{ kJ}$ , respectively. Buried pipe fresh air system could significantly increased air temperature, and air humidity of the outlet was lower than indoor humidity, it had well capacity of absorption of heat. It illustrated that buried pipe fresh air system could be used to improve the air conditions in the solar greenhouse in winter.

**Keywords:** solar greenhouse; buried pipe fresh air system; ventilation